

УДК 004.942

Оптимизация тепло-технологического процесса сушки движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей по критерию энергоресурсоэффективности

Бобков В. И.

Постановка задачи: проблема рационального использования топливно-энергетических ресурсов наиболее важна для энергоёмких промышленных производств, к числу которых относится термическая подготовка окомкованного рудного сырья в сложной многостадийной тепло-технологической системе (ТТС) обжиговой конвейерной машине для производства фосфоритовых окатышей. Оптимизация режимов сушки движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей в сложной ТТС, позволит повысить энергоресурсоэффективность ТТС в результате интенсификации и оптимизации тепло-массообменных процессов (ТМП) по минимуму себестоимости затрачиваемой электрической и тепловой энергии. **Целью работы** является повышение энергоресурсоэффективности ТТС, с использованием математической и компьютерной модели, процедуры оптимизации тепло-технологического процесса (ТПП) сушки движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей, отличающейся использованием дискретного динамического программирования и процедур контроля эффекта перераспределения влаги по высоте многослойной засыпки окатышей, что позволяет предотвращать появление горизонтов переувлажнения, негативно влияющих на газопроницаемость многослойной массы окатышей, приводящих к необоснованному росту энергопотребления и снижению производительности ТТС в целом. **Используемые методы:** методы системного анализа, дискретного динамического программирования, теории оптимального управления системами с распределёнными параметрами, условной многокритериальной оптимизации, вычислительной математики. **Результат:** представлены содержательная и математическая постановки задачи оптимизации (ТПП) сушки движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей в сложной, многостадийной (ТТС) конвейерной обжиговой машине, отличающаяся учётом тепло-технологических особенностей обжиговой машины, интенсивности процесса внутреннего влагопереноса в окатыше и процессов переувлажнения отдельных слоев окатышей и газа-теплоносителя, что позволяет повышать энергоэффективность посредством интенсификации ТМП динамической многослойной сушки. **Новизна:** разработаны математическая и компьютерная модели оптимизации ТПП сушки движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей, позволившие оптимизировать энергоресурсоэффективность сложной, динамической ТТС производства фосфоритовых окатышей. **Полученные результаты** применялись для расчета энергоэффективной сушки окатышей в ТТС обжиговой конвейерной машине. Обнаружено, что в оптимальном режиме многослойной сушки окатышей отсутствует зона переувлажнения, интенсифицируются ТМП, снижается расход энергии и увеличивается качество готового продукта, уменьшается доля возврата, обеспечивая ресурсосбережение.

Ключевые слова: тепло-технологическая система, тепло-технологический процесс, сушка, оптимизация, окатыши, фосфорит, энергоресурсоэффективность, обжиговая машина.

Библиографическая ссылка на статью:

Бобков В. И. Оптимизация тепло-технологического процесса сушки движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей по критерию энергоресурсоэффективности // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 2. С. 56–68. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-02/04-Bobkov.pdf>

Reference for citation:

Bobkov V. I. The heat-technological process optimization of a moving dense multilayer weight of phosphorite pellets drying process by the energy-resource efficiency criterion. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 2, pp. 56–68. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-02/04-Bobkov.pdf> (in Russian).

Актуальность

Проблема рационального использования сырьевых и топливно-энергетических ресурсов особенно важна для энергоёмких промышленных производств, к которым относятся конвейерные обжиговые машины для производства фосфоритовых окатышей, представляющие собой сложные тепло-технологические системы (ТТС). Режимы функционирования ТТС, а также условия проведения и завершённость тепло-технологического процесса (ТТП) сушки движущейся на конвейере плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей, определяют качество термической обработки окатышей. Изменение физико-химического или гранулометрического состава исходного минерального фосфатного сырья, поступающего в ТТС, требует проведения дорогостоящих экспериментальных исследований по определению тепло-физических и физико-химических свойств сырья, в соответствии с которыми осуществляется перенастройка параметров технологических режимов сложной ТТС обжиговой конвейерной машины [1, 2].

Выбор рациональных технологических схем и адаптация оптимальных технологических режимов ТТС к периодически меняющимся свойствам фосфатного сырья представляют собой сложную научно-техническую проблему, для решения которой необходимы дорогостоящие экспериментальные исследования, а порой и не осуществимые, из-за особенностей протекания ТТП во времени при больших температурах. Кроме того, все существующие в настоящее время методики расчёта энергоресурсоэффективности ТТП термической подготовки фосфатного сырья являются эмпирическими [3].

В связи с этим, проблема разработки методического и программно-информационного обеспечения системного анализа и процедур принятия решений по оптимизации энергоресурсоэффективности ТТС производства фосфоритовых окатышей является актуальной научной проблемой, успешное решение которой обеспечит повышение энергоресурсоэффективности ТТС и высокое качество готовых окатышей [4, 5].

Изменение свойств сырых фосфоритовых окатышей: влажности, прочности, гранулометрического состава, является причиной нарушения технологического режима ТТП сушки. Поэтому реализация ТТП сушки в режиме оптимума энергозатрат, на основе компьютерного моделирования имеет большое значение для практики [6]. Поскольку технологические ограничения ТТС существенно сужают диапазон варьирования параметров сушки, требуется тщательный анализ взаимовлияния всех факторов, определяющих режим сушки [7].

Содержательная постановка задачи оптимизации

Для постановки и решения задачи в работе введены обозначения, представленные в таблице 1.

Технологический режим сушки фосфоритовых окатышей определяется: температурой газа-теплоносителя на входе в движущийся плотный слой $T_{g0}(\tau)$ и скоростью его перекрёстной подачи $W_g(\tau)$. Качество и завершённость ТТП сушки характеризуются: тепловыми параметрами – температура окатышей $T_m(x, y, \tau)$, зависящая от координаты x по радиусу окатыша, координаты y высо-

ты в вертикальной многослойной укладке окатышей и времени τ её пребывания в зоне сушки при горизонтальном движении многослойной массы на конвейере обжиговой машины ХЭТС, градиент температуры $\partial T_m/\partial x$, скорость нагрева $\partial T_m/\partial \tau$, температура газа на выходе из слоя окатышей $T_{gh}(\tau)$ и параметрами состояния – влагосодержание $u(y, \tau)$, интенсивность влагопереноса $I(x, y, \tau)$, относительная степень высушивания $\psi(y, \tau)$ [8].

Таблица 1 – Обозначения

Обозначение	Физический смысл обозначения
T_g	– температура газа-теплоносителя, К
T_{g0}	– температура газа-теплоносителя на входе в многослойную массу окатышей, К
T_{gh}	– температура газа-теплоносителя на выходе из многослойной массы окатышей, К
W_g	– скорость подачи газа-теплоносителя, м/с
T_m	– температура материала окатышей, К
τ	– время, с
x	– координата радиуса окатышей
y	– координата вертикальной многослойной укладки окатышей (высота слоя)
I	– интенсивность влагопереноса в окатыше, кг/(м ² ·с)
u	– влагосодержание, кг/кг
ψ	– относительная степень высушивания окатышей
Q	– удельный расход энергии, Дж/кг
P	– себестоимость энергии, руб/Дж
l	– длина конвейера ТТС обжиговой машины, м
эл	– индекс для обозначения электрической энергии
теп	– индекс для обозначения тепловой энергии
кон	– индекс для обозначения конечного значения времени τ пребывания окатышей на конвейере ТТС
MAX	– индекс для обозначения максимального значения величины
$i=1...k$	– индекс для счетчика номера вакуум-камеры

Критерием завершённости ТТП служит – минимум влагосодержания среднего по высоте $0 \leq y \leq 0,35$ м вертикальной многослойной укладки окатышей

$$\bar{u} = \int_0^{0,35} u(y; \tau_{\text{кон}}) dy \text{ на выходе из зоны сушки } \tau = \tau_{\text{кон}}.$$

Себестоимость готового продукта в производстве фосфоритовых окатышей формируется главным образом за счет удельного расхода электрической $Q_{\text{эл}}$ и тепловой $Q_{\text{теп}}$ энергии [9]. Оптимальным считается технологический режим, при котором необходимое качество готового продукта, определяемое завершённостью процесса сушки $\bar{u} = 0$, достигается при минимуме стоимости израсходованной тепловой и электрической энергии, причем учитывается, что стоимость электрической энергии $P_{\text{эл}}$ в несколько раз дороже тепловой $P_{\text{теп}}$. Задача оптимизации формулируется так: найти такое значение вектора управляющих параметров $X(T_{g0}(\tau), W_g(\tau))$, чтобы значения \bar{u} и $P = P_{\text{эл}}Q_{\text{эл}}[W_g(\tau)] + P_{\text{теп}}Q_{\text{теп}}[T_{g0}(\tau)]$ дости-

гали своего наименьшего значения [10]. В силу технических особенностей обжиговой машины на вектор X управляющих параметров накладываются ограничения: на скорость $W_g(\tau) \leq W_{gMAX}$ и температуру $T_{g0}(\tau) \leq T_{gMAX}$ газа-теплоносителя на входе в слой, а также на вектор параметров состояния ХЭТП сушики $S(T_m, \partial T_m/\partial x, \partial T_m/\partial \tau, T_{gh}, u, I, \psi)$ – температуру газа-теплоносителя на выходе $T_{gh} \leq T_{gh}^{MAX}$, скорость нагрева $\partial T_m/\partial \tau \leq \Delta_1 T_m^{MAX}$ и градиент $\partial T_m/\partial x \leq \Delta_2 T_m^{MAX}$ температуры в окатыше, влагосодержание $u \leq u_{MAX}$ и интенсивность влагопереноса $I \leq I^{MAX}$ (см. рис. 1).

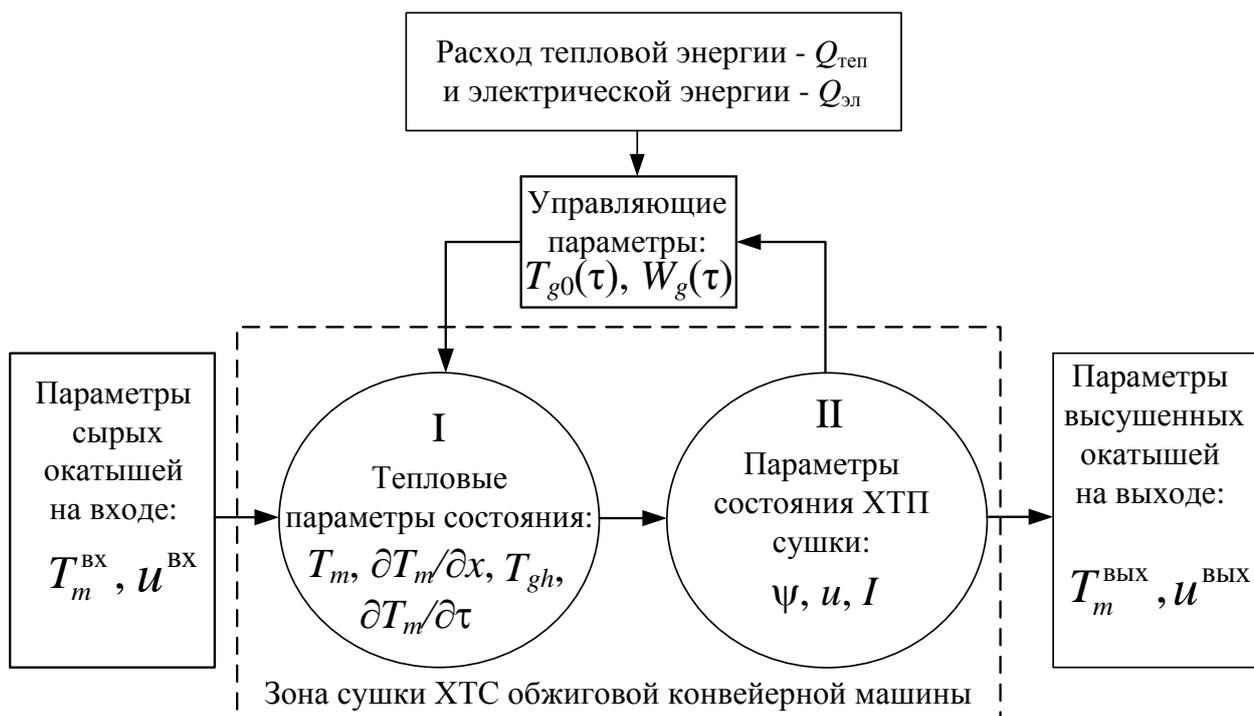


Рис. 1. Структурно-операторная схема ТТП сушки фосфоритовых окатышей в зоне сушки ТТС обжиговой машины:
I – оператор теплообмена, II – оператор сушики.

В качестве критерия эффективности (КЭ) рассматривается функционал:

$$F[T_{g0}(\tau), W_g(\tau)] = \alpha_1 \bar{u} [T_{g0}(\tau), W_g(\tau)] + \alpha_2 P [T_{g0}(\tau), W_g(\tau)], \quad (1)$$

где коэффициенты α_1 и α_2 обеспечивают ранжирование критериев в двухкритериальной задаче оптимизации [11, 12].

Математическое описание тепломассообменных процессов сушки движущейся многослойной массы фосфоритовых окатышей представляется в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП), решение которой возможно лишь численными методами, поэтому отыскать функции $T_{g0}(\tau)$ и $W_g(\tau)$ аналитическими методами, используя вариационное исчисление или принцип максимума Понтрягина, не представляется возможным.

Применение метода дискретного динамического программирования для повышения энергоэффективности ТТС

Дискретное динамическое программирование является специализированным вычислительным методом решения задач оптимизации сложных динамических систем, позволяющим представить процесс оптимизации в виде последовательности отдельных этапов (шагов). Применение декомпозиционно-топологических принципов позволяет получать все используемые в динамическом программировании функциональные рекуррентные соотношения. Особенности метода являются хорошая алгоритмируемость и возможность эффективного использования современных средств вычислительной техники [13].

Рассмотрим декомпозицию ТТП сушки, разбив время пребывания окатышей в зоне сушки ТТС на k равных частей, соответствующих длинам вакуум-камер Δl , получив временные промежутки $\Delta \tau$ (см. рис. 2).

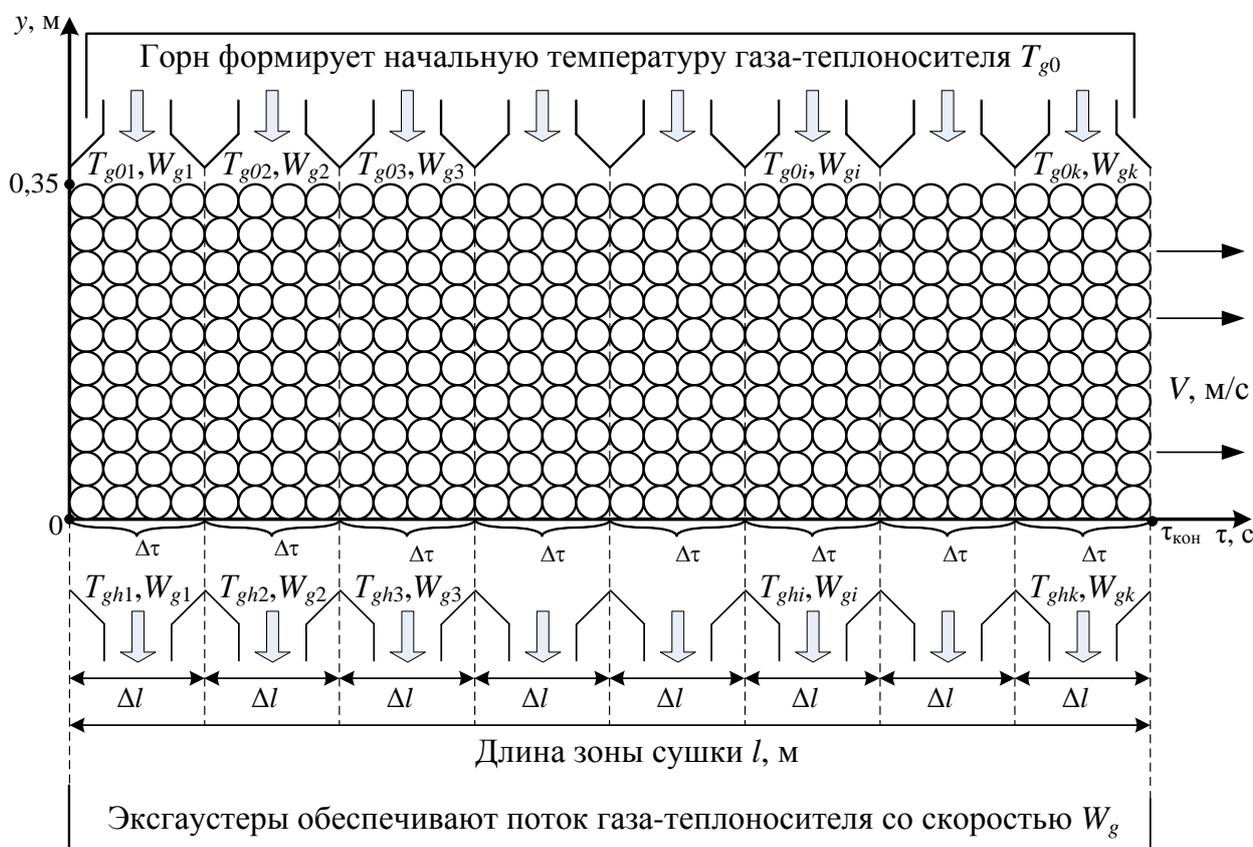


Рис. 2. Дискретизация времени пребывания окатышей в зоне сушки длиной l конвейерной обжиговой машины $0 \leq \tau \leq \tau_{\text{кон}}$ в зависимости от прохождения отдельных вакуум-камер длиной Δl , в которых формируется вектор управляющих параметров $X_i(T_{g0i}, W_{gi})$.

Очевидно, что каждый вектор S_i последующего состояния параметров ТТП сушки определяется его предыдущим состоянием S_{i-1} и вектором управляющих параметров $X_i(T_{g0i}, W_{gi}) - S_i = \varphi_i(S_{i-1}; X_i)$, а КЭ на каждом i -м шаге есть функция, зависящая от параметров состояния ТТП сушки на предыдущем $(i-1)$ -м шаге, и решения X_i , принятого на данном этапе $F_i = F(X_i; S_{i-1})$ (см. рис. 3).

Такая декомпозиция называется неявной – алгоритм требует координации стоимости $P_{эл}$ и $P_{теп}$ промежуточных переменных $Q_{эл}$ и $Q_{теп}$ ТТП. Задача оптимизации КЭ (1) на каждом i -м этапе неявной декомпозиции формулируется так: найти такие значения параметров T_{g0i} , W_{gi} оптимизирующего вектора X_i , чтобы КЭ (1) был минимальным:

$$F_i(T_{g0i}, W_{gi}) = \alpha_1 \bar{u}(T_{g0i}, W_{gi}) + \alpha_2 P(T_{g0i}, W_{gi}), \quad (2)$$

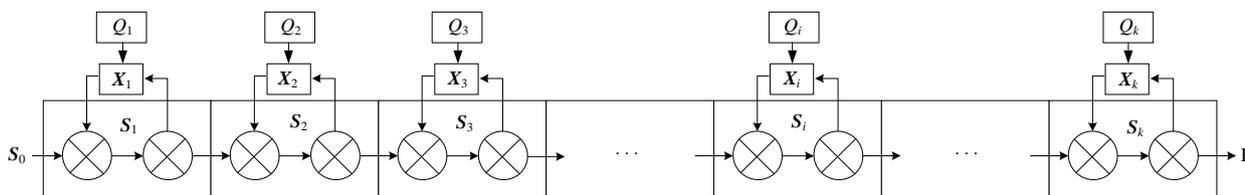


Рис. 3. Декомпозиционно-топологическая схема оптимизации ТТП сушки методом дискретного динамического программирования. S_0 – начальный вектор параметров состояния исходного сырья, сырых окатышей на входе, B – высушенные окатыши на выходе из зоны сушки, Q_i – расход энергии, X_i – вектор управляющих параметров, S_i – вектор параметров состояния ТТП сушки на i -м этапе декомпозиции.

Решение задачи динамического программирования начинается с последнего этапа. В этом случае условный минимум КЭ будет определяться по формуле:

$$F_k^*(S_{k-1}) = \min_{X_k} F_k(S_{k-1}, X_k),$$

где F_k^* – условный минимум КЭ, X_k^* – условное оптимальное управление на последнем шаге $i = k$.

Значение критерия эффективности на предпоследнем шаге $(k-1)$ -м шаге будет равно:

$$F_{k-1}(S_{k-2}) = F_{k-1}(S_{k-2}, X_{k-1}) + F_k^*(S_{k-1}) \quad (3)$$

В выражение (3) входит вектор параметров состояния S_{k-1} , поэтому, чтобы продолжить решение, необходимо определить, как изменится вектор параметров состояния под влиянием управления X_{k-1} на $(k-1)$ -м шаге:

$$S_{k-1} = \varphi_{k-1}(S_{k-2}; X_{k-1}).$$

Условный минимум КЭ на $(k-1)$ -м шаге определяется по формуле:

$$F_{k-1}^*(S_{k-2}) = \min_{X_{k-1}} \left\{ F_{k-1}(S_{k-2}, X_{k-1}) + F_k^*(\varphi_{k-1}(S_{k-2}, X_{k-1})) \right\}$$

из которой находится условный минимум $F_{k-1}^*(S_{k-2})$ и условный вектор оптимального управления X_{k-1}^* . Далее переходим к шагу $(k-2)$ и т.д.

Для i -го шага $((k-i+1)$ -й шаг с конца) получается уравнение Беллмана:

$$F_i^*(S_{i-1}) = \min_{X_i} \left\{ F_i(S_{i-1}, X_i) + F_{i+1}^*(\Phi_i(S_{i-1}, X_i)) \right\}. \quad (4)$$

Решая последовательно уравнение Беллмана (4) на каждом i -м шаге, получим минимумы КЭ $F_k^* \rightarrow F_{k-1}^* \rightarrow F_{k-2}^* \rightarrow \dots \rightarrow F_2^* \rightarrow F_1^*$ и условное оптимальное управление $X_k^* \rightarrow X_{k-1}^* \rightarrow X_{k-2}^* \rightarrow \dots \rightarrow X_2^* \rightarrow X_1^*$. Далее остаётся по известному начальному вектору параметров состояния S_0 определить состояние S_1 и найти минимум F_1 и оптимальное управление X_1 и так далее по цепочке, находя оптимальные значения параметров T_{g0i} , W_{gi} на каждом i -м этапе декомпозиции, получим доминирующую последовательность $\{X_i(T_{g0i}, W_{gi})\}_{i=1}^k$, формирующую динамический режим, оптимизирующий ТТП высушивания многослойной массы окатышей по всей зоне сушки ТТС обжиговой машины.

На каждом i -м этапе неявной декомпозиции локальный КЭ F_i представляет собой функцию двух переменных $F_i(T_{g0i}, W_{gi}) = \alpha_1 \bar{u}(T_{g0i}, W_{gi}) + \alpha_2 P(T_{g0i}, W_{gi})$, для которой требуется определить точку минимума $X_i^*(T_{g0i}^*, W_{gi}^*)$. Для решения этой задачи условной оптимизации, применялся метод деформируемого многогранника (Нелдера–Мида). Выполнение ограничений на управляющие параметры – скорость $0 \leq W_{gi} \leq W_g^{MAX}$ и температуру $0 \leq T_{g0i} \leq T_g^{MAX}$ теплоносителя на входе в слой достигается введением в функцию $F_i(T_{g0i}, W_{gi})$ барьерных функций, так как это ограничение является наиболее жестким, ибо оно обеспечивает математически-корректное и физически-осуществимое решение задачи [14]. Выполнение остальных условий: $T_{ghi} \leq T_{gh}^{MAX}$, $u \leq u^{MAX}$, $I \leq I^{MAX}$, $\partial T_m / \partial \tau \leq \Delta_1 T_m^{MAX}$, $\partial T_m / \partial x \leq \Delta_2 T_m^{MAX}$, осуществляется методом скользящего допущения и штрафных функций типа «квадрата срезки», с введением вспомогательного аргумента, обеспечивающего одинаковый порядок величин входящих в систему ограничений.

Вычислительная сложность разработанного алгоритма оптимизации локального КЭ F_i в процедуре оптимизации ТТП сушки движущейся плотной многослойной массы окатышей соответствует $O(G^3)$, где G – количество ограничений на управляющие переменные и параметры состояния.

При решении двухкритериальной задачи оптимизации, учитываются сведения о важности частных критериев $\bar{u}(T_{g0}, W_g)$ и $Q(T_{g0}, W_g)$. В данном случае эти частные критерии строго ранжированы по важности: во-первых, необходимо обеспечить завершённость ТТП сушки $\bar{u} \rightarrow 0$, во-вторых, при этом минимизировать удельный расход энергии $Q \rightarrow \min$. Поэтому применялся метод последовательных уступок: оптимизировался первый, наиболее важный критерий, затем назначалась величина допустимого отклонения значения этого критерия, и оптимизировался второй по важности критерий, при условии, что значение первого критерия не должно отличаться от минимального более чем на величину установленного отклонения (уступки).

Анализ результатов оптимизации ТТП

На основе разработанных автором алгоритмов динамического программирования и оптимизации, программно-реализованных в компьютерных моде-

лях в среде Borland C++, проводились многочисленные вычислительные эксперименты по оптимизации ТТП многослойной сушки фосфоритовых окатышей.

В оптимальном режиме сушки скорость газа-теплоносителя на протяжении всего процесса остается постоянной максимально-возможной 1,3м/с. Температура газа-теплоносителя медленно растет, скорость ее изменения обусловлена ограничениями на скорость нагрева, градиент температур, долю переувлажнения и интенсивность влагопереноса в окатыше рис. 4.

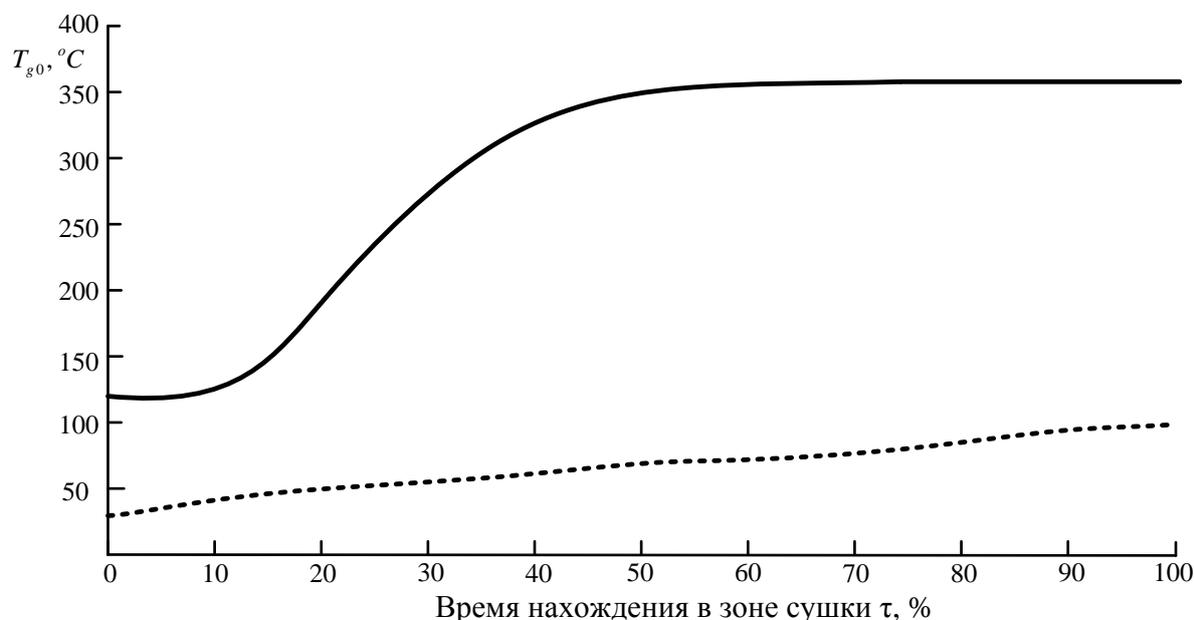


Рис. 3. График искомой функции $T_{g0}(\tau)$ температуры газа-теплоносителя на входе в слой ————— и $T_{gh}(\tau)$ на выходе из слоя

Таким образом, формируется режим, при котором температура теплоносителя умеренно растет, интенсифицируя процесс сушки в среднем по слою, и не допуская переувлажнения материала [15]. Причем газ-теплоноситель выносит максимально-возможное (зависящее от свойств теплоносителя и материала окатышей) количество влаги из слоя. Дальнейшее повышение температуры не несет значительного уменьшения среднего по слою влагосодержания, а расход тепловой энергии увеличивается [16]. Полученные результаты, применялись для расчета оптимального режима сушки фосфоритовых окатышей на обжиговой машине конвейерного типа ОК-520/536Ф.

Заключение

В результате проведенных исследований: представлена содержательная и математическая постановки задачи оптимизации ТТП сушки движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей в конвейерной обжиговой машине, разработаны математическая и компьютерная модели оптимизации энергоресурсоэффективности ТТС, отличающиеся учетом теплотехнологических особенностей обжиговой машины, интенсивности процесса внутреннего влагопереноса в окатыше и процессов переувлажнения отдельных слоев окатышей и газа-теплоносителя, что позволяет снижать энергозатраты, по-

средством интенсификации ТМП многослойной сушки. Анализ результатов полученного оптимального режима ТТП сушки показал, что в зоне сушки основная часть влаги удаляется раньше, чем материал поступает в зону подогрева и обжига и остаточная влага не в состоянии разрушить окатыш даже при интенсивном, но допустимом нагреве. Проводя сушку в оптимальном режиме, стоимость израсходованной энергии можно сократить в среднем на 8%.

В данной работе для математического описания ТТП сушки и оптимизации КЭ, используются системы ДУЧП, решение которых реализуется численными методами по разработанной автором компьютерной модели. Однако такой подход не позволяет учесть присущую теплофизическим характеристикам этих процессов неопределенность. Поэтому актуальной научной задачей является исследование этих процессов методами нечеткой математики. Итерационные вычисления над нечеткими переменными конечно-разностных уравнений приводят к проблеме возрастания (накопления) неопределенности и к «размыванию» результатов, вследствие чего они могут оказаться сложно интерпретируемыми и непригодными для дальнейшего анализа. В перспективе предлагается реализовать подход к решению ДУЧП в условиях неопределенности параметров ТТП сушки с использованием нечетких численных методов, который позволит исследовать распределение температуры сферических окатышей в движущейся на конвейере ТТС плотной многослойной массе в условиях неопределенности теплофизических характеристик.

Предлагаемый нечеткий подход позволит сформулировать содержательную постановку задачи нечеткой оптимизации КЭ для сложных многостадийных ТТС и определить пути решения этой современной научной и важной практической задачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 17-01-00189_a.

Литература

1. Мешалкин В. П., Бобков В. И. Ресурсосберегающие энергоэффективные технологии обработки фосфатного сырья // XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. – Екатеринбург, 2016. – С. 299.
2. Леонтьев Л. И. Физико-химические особенности комплексной переработки железо-содержащих руд и техногенных отходов // XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. – Екатеринбург, 2016. – С. 92.
3. Юсфин Ю. С., Пашков Н. Ф., Антоненко Л. К., Жак Р. М., Майзель Г. М., Базилевич Т. Н. Интенсификация производства и улучшение качества окатышей. – М.: Металлургия, 1994. – 240 с.
4. Luis P., Van der Bruggen B. Exergy analysis of energy-intensive production processes: advancing towards a sustainable chemical industry // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 2014. Vol. 89. № 9. P. 1288-1291.
5. Elgharbi S., Horchani-Naifer K., Férid M. Investigation of the structural and mineralogical changes of Tunisian phosphorite during calcinations // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2015. Vol. 119. № 1. P. 265-269.

6. Bobkov V. I., Borisov V. V., Dli M. I., Meshalkin V. P. Multicriterial optimization of the energy efficiency of the thermal preparation of raw materials // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2015. Vol. 49. № 6. P. 842-846.

7. Bobkov V. I., Borisov V. V., Dli M. I., Meshalkin V. P. Modeling the calcination of phosphorite pellets in a dense bed // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2015. Vol. 49. № 2. P.176-182.

8. Rudobashta S. P. Calculation of the kinetics of drying disperse materials on the basis of analytical methods // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2010. Vol. 83. № 4. P. 753-759.

9. Бобков В. И. Моделирование технологических процессов при термической подготовке дисперсного фосфатного сырья // Химическая технология. 2016. № 6. С. 263-271.

10. Panchenko S. V., Shirokikh T. V. Thermal Hydraulics of moving dispersive layer of process units // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2016. Vol. 50. № 2. P. 217-224.

11. Panchenko S. V., Shirokikh T. V. Thermophysical processes in burden zone of submerged arc furnaces // Theoretical Foundation of Chemical Engineering. 2014. Vol. 48. № 1. P.77-81.

12. Meshalkin V. P., Men'shikov V. V., Panchenko S. V., Panchenko D. S., Kazak A. S. Computer-aided simulation of heat- and mass-transfer processes in an ore-reduction electrothermal reactor // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2015. Vol. 49. № 5. P. 55-60.

13. Бобков В. И., Борисов В. В., Дли М. И. Подход к исследованию теплопроводности нечеткими численными методами в условиях неопределенности теплофизических характеристик // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 3. С. 73-83.

14. Meshalkin V. P., Kolesnikov V. A., Desyatov A. V., Milyutina A. D., Kolesnikov A. V. Physicochemical efficiency of electroflotation of finely divided carbon nanomaterial from aqueous solutions containing surfactants // Doklady Chemistry. 2017. Vol. 476(1). P. 219-222.

15. Panchenko S. V., Dli M. I., Borisov V. V., Panchenko D. S. Analysis of thermalphysic processes in near-electrode zone of electrothermal reactor // Non-ferrous Metals. 2016. Vol. 2. P. 57-64.

16. Panchenko S. V., Meshalkin V. P., Dli M. I., Borisov V. V. Computer-visual model of thermophysical processes in electrothermal reactor // Tsvetnye Metally. 2015. Vol. 4. P. 55-60.

References

1. Meshalkin V. P., Bobkov V. I. Resource-saving energy efficient technologies of processing of phosphatic raw materials. *XX Mendeleevskii s"ezd po obshchei i prikladnoi khimii* [XX Mendeleev congress on general and applied chemical]. Ekaterinburg, 2016, p. 299. (in Russian)

2. Leont'ev L. I. Physical and chemical features of the complex processing of iron-stones and technogenic wastes. *XX Mendeleevskii s"ezd po obshchei i prikladnoi*

khimii [XX Mendeleev congress on general and applied chemical]. Ekaterinburg, 2016, p. 92. (in Russian)

3. Iusfin Iu. S., Pashkov N. F., Antonenko L. K., Zhak R. M., Maizel' G. M., Bazilevich T. N. *Intensifikatsiia proizvodstva i uluchshenie kachestva okatyshei* [Intensification of production and improvement of quality of pellets]. Moscow, Metallurgiya, 1994. 240p. (in Russian)

4. Luis P., Van der Bruggen B. Exergy analysis of energy-intensive production processes: advancing towards a sustainable chemical industry. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2014, vol. 89, no. 9. pp. 1288-1291.

5. Elgharbi S., Horchani-Naifer K., Férid M. Investigation of the structural and mineralogical changes of Tunisian phosphorite during calcinations. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2015, vol. 119, no 1, pp. 265-269.

6. Bobkov V. I., Borisov V. V., Dli M. I., Meshalkin V. P. Multicriterial optimization of the energy efficiency of the thermal preparation of raw materials. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2015, vol. 49, no. 6, pp. 842-846.

7. Bobkov V. I., Borisov V. V., Dli M. I., Meshalkin V. P. Modeling the calcination of phosphorite pellets in a dense bed. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2015, vol. 49, no.2, pp.176-182.

8. Rudobashta S. P. Calculation of the kinetics of drying disperse materials on the basis of analytical methods. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2010, vol. 83, no. 4, pp. 753-759.

9. Bobkov V. I. Modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov pri termicheskoi podgotovke dispersnogo fosfatnogo syr'ia [Design of technological processes at thermal preparation of dispersible phosphatic raw material]. *Chemical Engineering*, 2016, no. 6, pp. 263-271 (in Russian).

10. Panchenko S. V., Shirokikh T. V. Thermal Hydraulics of moving dispersive layer of process units. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2016, vol. 50, no. 2, pp. 217-224.

11. Panchenko S. V., Shirokikh T. V. Thermophysical processes in burden zone of submerged arc furnaces. *Theoretical Foundation of Chemical Engineering*, 2014, vol. 48, no. 1, pp. 77-81.

12. Meshalkin V. P., Men'shikov V. V., Panchenko S. V., Panchenko D. S., Kazak A. S. Computer-aided simulation of heat- and mass-transfer processes in an ore-reduction electrothermal reactor. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2015, vol. 49, no. 5, pp. 55-60.

13. Bobkov V. I., Borisov V. V., Dli M. I. Approach to a Heat Conductivity Research by Fuzzy Numerical Methods in the Conditions of Indeterminacy Thermal Characteristics. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 3, pp. 73-83. (in Russian).

14. Meshalkin V. P., Kolesnikov V. A., Desyatov A. V., Milyutina A. D., Kolesnikov A. V. Physicochemical efficiency of electroflotation of finely divided carbon nanomaterial from aqueous solutions containing surfactants. *Doklady Chemistry*, 2017, vol. 476(1), pp. 219-222.

15. Pancnehko S. V., Dli M. I., Borisov V. V., Panchenko D. S. Analysis of thermalphysic processes in near-electrode zone of electrothermal reactor. *Non-ferrous Metals*, 2016, no. 2, pp. 57-64.

16. Panchenko S. V., Meshalkin V. P., Dli M. I., Borisov V. V. Computer-visual model of thermophysical processes in electrothermal reactor. *Tsvetnye Metally*, 2015, no. 4, pp. 55-60.

Статья поступила 3 апреля 2018 г.

Информация об авторе

Бобков Владимир Иванович – кандидат технических наук. Доцент кафедры высшей математики. Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», филиал в г. Смоленске. Области научных интересов: системный анализ сложных теплотехнологических систем; оптимизация теплотехнологических процессов; математическое моделирование; интеллектуальная поддержка принятия решений; интеллектуальный анализ данных. E-mail: vovabobkoff@mail.ru

Адрес: 214013, Россия, г. Смоленск, Энергетический проезд, д. 1.

The heat-technological process optimization of a moving dense multilayer weight of phosphorite pellets drying process by the energy-resource efficiency criterion

V. I. Bobkov

Statement of the problem: the problem of fuel and energy resources rational use is the most important one for energy-intensive industrial production, including the thermal preparation of pelletized raw materials in a complex multi-stage heat-technological system (HTS) by a horizontal-grate machine for the phosphorite pellets production. The drying modes optimization of a moving dense multilayer weight of phosphorite pellets in a complex HTS will increase the energy and resource efficiency of HTS as a result of heat-mass exchange processes (HMP) augmentation and optimization at an energy and heat minimum cost. **The aim of the work** is to increase the energy-resource efficiency of HTS, using the mathematical and computer model, the heat-technological process (HTP) optimization of the moving dense multilayer weight of phosphorite pellets drying process, characterized by the use of discrete dynamic programming and the control of the moisture redistribution effect by the height of the pellets multilayer backfilling, which allows to prevent the appearance of waterlogging horizons, negatively affecting the multilayer pellets weight gas permeability, that leads to unnecessary energy consumption increase and reduction of HTS performance in general. **The methods used:** system concept, discrete dynamic programming, optimal control theory of distributed parameters system, conditional multi-criteria optimization, computational mathematics. **The result:** the content and mathematical statements of the optimization problem (HTP) for moving dense multilayer weight of phosphorite pellets drying process in the complex multistage (HTS) horizontal-grate machine that is characterized by the heat-technological features of this horizontal-grate machine, the internal moisture transfer process intensity in the pellet and the waterlogging of separate pellets layers processes and gas-coolant, which allows to increase energy efficiency through intensification of dynamic multilayer drying HMP were submitted. **Novelty:** mathematical and computer models for optimizing the a moving dense multi-layer weight of phosphorite pellets drying HTP have been developed, which have made it possible to optimize the energy and resource efficiency of a complex dynamic phosphate pellet production HTS. **The obtained results** were used to calculate the energy-efficient drying of pellets in the HTS by a horizontal-grate machine. It was also found out that there is no waterlogging zone in the optimal mode of multilayer pellets drying, that HMP are intensified, the energy consumption is reduced and the end-product quality is increased, the share of return is reduced, that provides resource saving.

Keywords: heat-technological system, heat-technological process, drying, optimization, pellets, phosphorite, energy-resource efficiency, horizontal-grate machine.

Information about Author

Vladimir Ivanovich Bobkov – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Dept of Mathematics. The Branch of National Research University “Moscow Power Engineering Institute” in Smolensk. Fields of research: system analysis of complex heat engineering systems; optimization of heat engineering processes; math modeling; intellectual decision-making support; data mining. E-mail: vovabobkoff@mail.ru

Address: Russia, 214013, Smolensk, Energeticheskiy proezd, 1.